球による高速な衝突判定の一手法

Fast Collision Detection Using a Sphere Tree

学生会員 藤井 宏道[†], 正会員 小堀 研一^{††}, 西川 禎一^{††}
Hiromichi Fujii[†], Kenichi Kobori^{††} and Yoshikazu Nishikawa^{††}

Abstract In a virtual-space walk-through system, collisions between three-dimensional objects should be detected in real time. Generally, such collision detection is done by using the intersections of the surfaces of the objects. When the objects become complex, however, collision detection in real time is difficult because of its heavy calculation cost. Therefore, collision detection is done by approximating each object as a group of spheres. To improve the approximation, the spheres must be made smaller, but doing so makes collision detection in real time more difficult. To solve this problem, we have developed a fast collision-detection method that reduces the number of spheres. Experimental results showed that it is faster than conventional methods.

キーワード: 空間分割モデル, ランレングス, デジタル円, 充填球, 外包球, 8分木

1. ま え が き

仮想空間ウォークスルーシステムにおいては、動的オブジェクトである3次元物体どうしの衝突を考慮する必要がある。また、実時間で衝突判定を処理する必要がある。

一般に、3次元物体どうしの衝突判定は物体形状を構成する面などを用いて交差チェックを行う¹⁾。そのため、形状が複雑になると計算コストが急激に増大し、実時間での衝突の有無を検出することが困難となる。そこで、一般には物体をより簡単な形状に近似することが行われる。本研究では、形状を球群で近似して衝突判定に用いることを考えた。球どうしの衝突の有無は、衝突する関係にある球どうしの中心間の距離と球どうしの半径の和を比較するだけで容易に検出することが可能である。それにより演算量を大幅に削減することが可能である。また、球同士の判定においては、あらゆる角度から衝突した場合でも計算コストは一定であり、動的オブジェクトがさまざまな角度で衝突する可能性が十分に考えられるウォークスルーシステムにおいては有効であると考えられる。

本手法では、物体内部に大きさの異なる複数の球を充填

し、形状を球群により近似する。現在、大きさの異なる複数の球を用いて形状を近似する手法として、ボロノイ領域を用いた手法²⁾³⁾や8分木を用いた手法^{4)~6)}が提案されている。これらの手法は、形状の近似誤差が大きいという問題や、形状の表面を小さな球群で近似するため球の数が大幅に増大し、その計算コストも同様に増大する問題がある。よって、実時間での処理を行うためには、形状内部に充填する球の数をできるだけ少なくし、かつ、形状との近似誤差を低く抑えることが重要であると考えられる。

そこで本手法では、球どうしの重複を許す条件で形状の内部に、形状表面に接する大きさの異なる球を充填する。そして、これらの充填球群に対して外包球を生成して8分木構造を構成する。

以上の処理を前処理とし、ウォークスルーシステムにおいて、動的オブジェクト各々に対して求めた8分木どうしの交差判定を行うことにより、実時間での衝突判定を実現する。

2. 従 来 法

一般に、形状を構成する面どうしの衝突判定は、形状が複雑になると計算コストが急激に増大し、実時間での衝突の有無を検出することが困難となる。そこで、8分木を用いて形状を球群で近似する手法が一般によく知られている⁵⁾。8分木の生成は、形状全体を外包する立方体をルートオクタントとし、形状の表面に最大分割レベルのオクタントが生成されるまで分割を繰り返すことにより生成する。そして8分木の各々のオクタントについてオクタントを外包する球を求め、8分木構造となった球群どうしでの

1999年9月30日, 1999年情報処理学会全国大会で発表

1999年8月31日受付, 1999年11月5日採録

[†] 大阪工業大学 電気電子工学専攻
(〒535-8585 大阪市旭区大宮5-16-1, TEL 06-954-4307)

^{††} 大阪工業大学 情報科学部
(〒573-0196 枚方市北山1-79-1, TEL 0720-66-5391)

[†] Department of Electric & Electronic Engineering, Osaka Institute of Technology
(5-16-1, Ohmiya, Asahi-ku, Osaka-shi, Osaka 535-8585, Japan)

^{††} Faculty of Information Science, Osaka Institute of Technology
(1-79-1 Kitayama, Hirakata-shi, Osaka 573-0196, Japan)

衝突判定を行う。本稿では、これを従来法と呼ぶ。従来法では形状の表面を最大分割レベルの球群で表現しているため、8分木の充填球の数が多くなり、実時間による衝突判定の処理は困難であると考えられる。そこで本稿では、球の数を削減するための手法を提案する。

3. 提案手法

最初に本手法の処理の概要を示し、その後、各々の詳細を述べる。

- (1) 形状の内部に形状を近似する大きさの異なる球群を充填する。
- (2) 充填球を外包する球を用いて、外包球の8分木を生成する。
- (3) 対象となる形状の8分木を用いて物体どうしの衝突判定を行う。

本稿では3次元形状を対象にしているが、以降の説明は簡単のため2次元で行う。

3.1 充填球の生成

本手法では球の中心座標を求めるため、最初に形状データを境界表現モデルから空間分割モデル⁷⁾である3次元の2値(白と黒)ボクセル群に変換する⁸⁾。以降、本稿ではこの2値ボクセル群データのことを画像と呼び、ボクセルのことを画素という。また、最初に形状の内部を黒画素、外部を白画素で初期化する(図1)。

次に、形状の内部に充填するべき球(充填球)を生成するための手順の概要を示す。

(1) 充填候補球の生成

形状の画像の黒画素に対して、ランレングス⁹⁾を求め、充填球の候補の中心座標と半径を求める。

(2) 充填候補球の内外判定

円を高速に描画するミッチェナーのアルゴリズムを用いて、手順(1)で求めた充填候補球と形状の画像との内外判定を行い、内部と判定された場合に充填球として採用する。

(3) 白画素による塗りつぶし処理

手順(2)において採用された球の内部にある形状の画像を白画素にする。そして、手順3によって更新された画像を形状の画像として、再び手順(1)を行

図1 データ変換
Data transformation.

う。

以上の処理を、手順3において形状の画像が全て白画素になるまで繰り返す。

以下、これらの手順(1)、(2)、(3)について詳細を述べる。

(1) 充填候補球の生成

まず、形状の画像を x, y の各方向に探索し、 x, y 各方向のランレングスを生成する。図2(a)に示すように、充填する円を近似する十字の画像を考え、この十字の画像が形状の画像の内部に入るか否かを検査する。そのため、図2(b)に示すように、形状の画像の x 方向のランレングスの長さ m と十字の画像の x 方向の長さ l を比較する。十字の画像の方が短い場合、 y 方向についても同様に比較する。その結果、この十字の画像が形状の画像の内部に入る場合、図2(c)の十字の中心である画素 p を充填候補円

(a) 十字の画像

(b) ランレングスと十字の画像の比較

(c) 充填候補円

図2 充填候補円の生成
Generation of the filling candidated circle.

の中心座標，十字の長さ r を候補円の半径とする．本手法では充填円どうしの重複を許す条件であるため，形状の画像の内部であると判定された同じ大きさの十字の画像はすべて充填候補円とする．

十字の画像が全く形状の画像の内部に入らない場合は，十字の画像の両端を1画素縮めてその大きさを小さくし，再び十字の画像と形状の画像の内外判定を行う．この処理は，十字の画像が形状の画像の内部に入るまで繰り返す．

(2) 充填候補球の内外判定

手順(1)において，内部と判定された充填候補球の表面が形状の画像の内部に入るかどうかを判定する．そのため，2次元において高速にデジタル円を描画するミッチェナーのアルゴリズム¹⁰⁾を3次元に拡張する．

ミッチェナーのアルゴリズムは，原点を中心とする半径 r (r は整数) のデジタル円を $1/8$ 円の円弧として8連結で描く．残りの範囲は円の対称性を利用して描く．

本手法では，手順(1)により求めた充填候補球の中心座標 p と半径 r を用いて，ミッチェナーのアルゴリズムにより生成されるすべての座標の画素が形状内部にあるか否かを判定する．そして，すべての画素が形状の内部と判定された場合，充填候補球の中心座標と半径を充填球の中心

座標と半径として決定する．

ミッチェナーのアルゴリズムの3次元への拡張は，最初に xy 平面において2次元のデジタル円を描く．次に，図3(a)に示すようにデジタル円の画素までの y 方向の距離 r を半径として，図3(b)に示すように， yz 平面において2次元のデジタル円を描くことにより3次元化を行う．

以上の処理により，デジタル球である充填候補球と形状の画像との内外判定を行い，内部と判定された場合，図4に示すように，充填候補球の中心座標と半径を充填球の中心座標と半径として採用する．

(3) 白画素による塗りつぶし処理

手順(2)において採用されたすべての充填円に対して，図5に示すように，充填円の内部に含まれる形状の画像を白画素で塗りつぶす．そして，再び手順(1)に戻り，充填候補円から充填円を決定し，同様の処理を行い，黒画素がなくなった時点で処理を終了する．

3.2 8分木の生成

上記において求めた充填球群を8分木構造とすることにより，衝突判定において検索する球の数を減少させ，計算コストをより低く抑える．ここでは，木の生成を2次元の4分木で説明する．

図6(a)のように，形状の内部に複数の円が充填された

(a) yz 平面のデジタル円の半径

(b) 3次元化

図3 ミッチェナーのアルゴリズムの3次元への適用
Applying Michener's algorithm to three dimensional space.

図4 充填球の中心座標と半径
The center and radius of the filling sphere.

図5 白画素による塗りつぶし処理
Painting an image of the object in white pixels.

場合の4分木の生成手順を以下に示す。

まず、図6(b)に示すように形状を外包する正方領域を考える。そして、正方領域に対して以下の処理を行う。

- (1) 正方領域に円の中心座標が複数あるか否か調べる。
- (2) (1)において複数ある場合、図6(c)のように正方領域を4分割する。4分割した各々の領域について(1)を繰り返す。
- (3) (1)において、各々の正方領域に円が1個しか存在しない場合、その円の中心座標と半径を4分木の葉ノードのデータとし処理を終了する。また、円が0個の場合は処理を終了する。

分割の結果を図6(d)に示す。また、分割の結果により生成された4分木を図6(e)に示す。上記の処理では末端の葉ノードのみに円のデータが生成された状態であるので、次に4分木の各ノードに外包円を生成する。

本手法では、図7(a)に示すように木構造の親子関係を用いて外包円を生成する。まず葉ノードを子とし、複数の子の円を外包する外包円を生成する。さらに、複数の外包円を子とし、その親である外包円を外包する円を生成する。以上の処理を木の根であるルートノードに達するまで

図6 4分木の葉ノードの生成
Generation of Quad-Tree leaf node.

行う。

図7(b)に示す3個の子の円A, B, Cを例にとって外包円の生成手順を示す。

外包円の中心座標は、同図(c)のように円A, B, Cの中心座標 P_a , P_b , P_c を外包する長方形Qを考える。そして長方形Qの中心座標 P_o を外包円の中心座標とする。

また外包円の半径は、図7(d)に示すように外包円の中心座標 P_o から子の円の中心点を通り、円の最も遠い地点までの距離 a , b , c を求める。そして、距離 a , b , c の中で最長のものを外包円の半径とする。図7(d)においては距離 a が最長であるため、外包円は図7(e)のようになる。

図7 外包円の生成
Generation of the merge circle which covers filling circles.

図8 衝突判定の手順
The process of a collision detection.

(a) 実験形状

bottle

microscope

body

hourglass

(b) 従来法における球の充填

bottle

microscope

body

hourglass

(c) 本手法における球の充填

図 9 実験形状と充填球

Four objects in the experiments and their filling spheres.

以上の処理により、衝突判定に用いる8分木を生成する。

3.3 衝突判定

本手法では、生成された8分木を用いて衝突判定を行う。説明は簡単のために2次元の4分木で行う。

まず最初にオブジェクトA, Bの4分木のルートノードであるレベル0の外包円どうしで衝突判定を行う。そして、レベル0の外包円どうしが衝突する場合、図8の矢印①に示すように、オブジェクトAのレベル0の外包円とオブジェクトBのレベル0の外包円の内部にあるレベル1の外包円との衝突判定を行う。また、逆にオブジェクトBのレベル0の外包円とオブジェクトAのレベル0の外包円の内部にあるレベル1の外包円との衝突判定を行う。そして、矢印②に示すように、衝突したすべてのレベル1の円どうしにより衝突判定を行う。そして、図8に示すレベル1の灰色の外包円が衝突していると判定された場合、衝突したレベル1の外包円の内部に含まれる外包円に対して、以下同様の処理を葉ノードに達するまで繰り返す。そして、オブジェクトA, Bの葉ノードである充填円どうしで衝突判定を行い、衝突と判定された場合に2つのオブジェクトは衝突したと決定される。

4. 実験

本手法の有効性を検証するため、いくつかの製品形状に対して従来法と本手法の衝突判定の比較および、形状近似誤差の計測を行った。なお、実験にはシリコングラフィクス社製GWS(CPU: R 10000, 175 MHz)を使用した。

実験で扱った多面体形状の一例を図9(a)に示す。また、名前の横に形状の面数を示す。なお、空間分割の解像度は、レベル6($64 \times 64 \times 64$), レベル7($128 \times 128 \times 128$), レベル8($256 \times 256 \times 256$)として、各々について実験を行った。

また、各解像度における従来法による球の充填結果を図9(b)に示す。そして、本手法による球の充填結果を図9(c)に示す。なお、図9(b)(c)のレベルの横にそれぞれの充填球の個数を示す。

図 10 8分木の生成時間
Generation times of Octree.

次に、本手法における8分木の生成時間を4つの形状の平均値として図10に示す。

衝突判定実験では形状を空間にランダムに1000回配置した時の各々の処理時間を総和し、その平均時間を図11に示す。また、本手法と従来法の充填球の数を図12に示す。図11と図12のグラフも4つの形状の平均値である。

次に、本手法と従来法の充填球群と物体形状との充填誤差の結果を4つの形状の平均値として図13に示す。

ここでの充填誤差は、形状を構成する面から充填球群がはみ出ている部分と充填できていない部分とを合計した体

図 11 衝突判定時間
Collision detection time.

図 12 充填球の数
The number of the filling spheres.

図 13 充填誤差
Filling accuracy.

積と形状の多面体の体積との比としている。

5. 考 察

まず、図9の(c)より本手法は球の充填状態から、レベルを上げていくと形状を効率良く近似していることがわかる。また、大きな球で形状を表現できている状態がわかる。

一方、図10に示す8分木の生成にかかる時間については、従来法は8分木のオクタントから球の中心座標と半径を求めるだけなのに対して、本手法はランレングスやデジタル球を用いて球の中心座標と半径を探索する必要があるため、処理時間がかかっている。しかし、本手法では、8分木の生成は前処理として行うため、ウォークスルー時の処理負荷としては問題にならない。

次に、図11に示す衝突判定時間において、本手法は従来法に比較して4倍程度速くなっていることがわかる。これは、図12に示す充填球の数が、従来法は本手法よりも4倍程度多くなっているため、衝突判定の処理コストも同様に増大すると考えられる。このことから本手法は従来法に比べ、より高速に衝突判定処理を行うことが可能である。

また、充填誤差について、本手法の方が充填球の数が少ないにもかかわらず従来法よりも良い結果となっている。これは、従来法では球がオクタントを外包するように生成されることにより、図9(b)のhourglassの充填球に見られるように、本手法に比べて原形状をはみ出すためであると考えられる。

なお、充填誤差がレベル8において10%になっているが、これは体積として誤差を表現した場合であり、実際に衝突判定を行う場合は距離として考える必要がある。例えば、レベル8での体積値の3乗根の値を距離として換算すると、本手法の近似誤差は3%程度となり、ウォークスルーシステムの衝突判定の精度として実用上問題は無いと考えられる。

図12、図13からわかるように、各解像度において従来法よりも少ない球で充填球群を効率良く充填することができた。

6. む す び

本手法では、形状の内部に効率良く球群を充填するため

に、球の中心と半径の決定に2次元の画像ランレングスを3次元に拡張した。また、衝突判定において判定を行う球の数を削減するために、外包球により充填球を8分木構造とした。そして、8分木を用いて衝突判定の実験を行った。その実験結果から、従来法に比べて判定の処理コストを抑えることができ、本手法の有効性を確認した。

今後は、8分木の生成手法の効率化を図り、生成時間の短縮を行い、より高速な判定手法を確立していくことを検討する。

(文 献)

- 1) 北村, 竹村, ナレンドラ, 岸野: "octree と多面体表現を用いた三次元物体間の衝突検出", 信学技報, IE 94-16, pp. 45-51 (1994)
- 2) P. M. Hubbard: "Time-Critical Collision Detection", ACM Transactions on Graphics, 15, 3, pp. 179-210 (1996)
- 3) M. C. Lin, J. F. Canny: "Efficient Collision Detection for Animation", Proc. of the Third Euro-graphics Workshop on Animation, Cambridge (1992)
- 4) A. Pasqual del Pobil, M. A. Serna: "3 D Motion Planning Based on a Spherical Hierarchical Representation", Proceedings of International Symposium on Artificial Intelligence, pp. 91-97 (1991)
- 5) I. J. Palmer, R. L. Grimsdale: "Collision Detection for Animation using Sphere-Tree", Computer Graphics, 14, 2, pp. 105-116 (1995)
- 6) M. Agate, R. L. Grimsdale, P. F. Lister: "The HERO Algorithm for Ray-Tracing Octrees", pp. 61-73 in Advances in Computer Graphics IV, R. L. Grimsdale and W. StraBer (eds.), Springer-Verlag (1991)
- 7) F. Foley, A. VanDam, S. Feiner, J. Hughes: "Computer Graphics Principles and Practice Second Edition", pp. 549-555 Addison Wesley Publishing Company, (1990)
- 8) 石黒, 小堀, 久津輪: "境界表現から Octree 表現への一変換手法", システム制御学会論文誌, 8, 3, pp. 97-105 (1995)
- 9) テレビジョン学会編: "画像情報圧縮", pp. 150-153, オーム社 (1991)
- 10) 中嶋編: "コンピュータグラフィックス", pp. 41-62, 財団法人画像情報教育振興協会, (1998)

ふじい ひろみち
藤井 宏道 1998年、大阪工業大学電子工学科卒業。現在、同大学院電気電子工学専攻博士前期課程において、3次元画像処理に関する研究に従事。学生会員。

こぼり けんいち
小堀 研一 1975年、山梨大学大学院修士課程修了。1975年、シャープ(株)に入社。以後、一貫してCAD, CAM, CGに関する研究開発に従事。1991年大阪工業大学に奉職。現在、同大学情報科学部情報処理学科教授。CAD, CG, パーチャルリアリティの研究に従事。工学博士。正会員。

にしかわ よしかず
西川 禎一 1955年、京都大学工学部電気(工学科)卒業。1960年、同大学院博士課程修了。同年、京都大学工学部助手、1972年、同教授。1993年より、京都大学工学部長、総長特別補佐を兼任。1996年、京都大学を定年退官し、現在、大阪工業大学大情報科学部長。その間、米UCLA客員助教授、IIASA研究員等を歴任、第16期日本学術会議会員。工学博士。